发电商合同违约风险的评估及规避

赵珊珊，梁 双，张东霞，印永华
（中国电力科学研究院，北京市 100192）

摘要： 风险评估和规避是电力市场环境下的重要工作。提出了工程风险和金融风险的综合评估方法及联合规避策略。重点针对发电商合同违约风险开展研究，采用预留备用容量方法实现风险规避，定量评估不同备用容量比例下的风险规避效果。以加拿大 Alberta 省电力市场为算例，仿真结果表明，预留备用容量能改变净缺额发电容量的分布，从而实现发电商合同违约风险规避的目标。

关键词： 合同违约风险；风险评估；风险规避；电力市场

0 引言

风险评估和规避是电力市场环境下的重要工作。目前的研究大多针对单纯工程风险[1-3]或者金融风险[4]，实际情况是工程风险和金融风险常常同时存在或者相互影响[5-7]，发电商合同违约风险即属于此类情况。缺额发电容量的存在使得发电商无法正常履行与零售商签订的合同，在没有其他规避措施时，发电商必须去实时市场购电以平衡缺额电量，此时发电商需同时面临缺额发电容量和实时市场价格波动的风险，即交织的工程风险和金融风险。

文献[6]研究了同时考虑工程风险和金融风险时，如何实现零售商收入效用函数的期望最大。文献[7]分析了澳大利亚电力市场机组故障出现在批发市场尖峰电价时，发电商面临的最大损失，但仅是粗略分析，缺乏对 2 个不确定性事件同时出现造成后果的定量化评价。因此，本文提出了工程风险和金融风险的综合评估方法及联合规避策略，重点针对发电商合同违约风险开展研究，采用预留备用容量的方法实现风险的规避，定量评估不同备用容量比例下的风险规避效果。

1 损失函数的定义及分布

1.1 损失函数的定义

定义缺额发电容量 X 为期望发电容量和实际发电容量的差值。定义净缺额发电容量为 Y，即

$$Y = \max\{X - k_r, 0\} \tag{1}$$

式中：k_r 为备用容量，当 $k_r=0$ 时，有 $Y=X$；X，Y，k_r 均以额定容量为基值标幺化。

未考虑缺额发电容量 X 时的获利函数为：

$$G^0 = G_f^0 + G_s^0 = (f-c)sk_f t_f \cos\varphi + (P-c)sk_s t_s \cos\varphi \tag{2}$$

式中：G^0，G_f^0，G_s^0 分别为未考虑 X 时的总获利、合同部分获利和实时部分获利；k_f 和 k_s 分别为合同部分和实时部分占额定容量的比例；t_f 和 t_s 分别为合同部分和实时部分对应的发电持续时间；s 为额定容量；$\cos\varphi$ 为发电机组功率因数；P，f，c 分别为实时电价、合同电价及成本电价，P 为随机变量。

考虑缺额发电容量 X，则部分合同不能履行，要去实时市场购电平衡。此时获利函数为：

$$G^1 = G_f^1 + G_s^1 \tag{3}$$

式中：G^1，G_f^1，G_s^1 分别为考虑 X 情况下的总获利、合同部分获利和实时部分获利，

$$G_f^1 = G_f^0 - (f-c)sYT_Y\cos\varphi + (f-P)\cdot sYT_Y\cos\varphi = G_f^0 + (c-P)sYT_Y\cos\varphi \tag{4}$$

T_Y 为净缺额发电容量持续时间，为随机变量。

考虑 X 前后，实时部分获利不变，有

$$G_s^1 = G_s^0 \tag{5}$$

将式(3)～式(5)联立，得到：

$$G^1 = G_f^0 + G_s^0 + (c-P)sYT_Y\cos\varphi = G^0 + (c-P)sYT_Y\cos\varphi \tag{6}$$

令 $G_Y=(c-P)sYT_Y\cos\varphi$，即为缺额发电容量造成的获利函数。对应的损失函数 L_Y 为：

$$L_Y = (P-c)sYT_Y\cos\varphi \tag{7}$$

1.2 缺额发电容量 X 和净缺额发电容量 Y 的分布

1）缺额发电容量 X 的分布

根据 X 的实际统计结果，可以假设 X 服从改进型指数分布，其在零点处有离散的概率值：

$$\Pr\{X=0\} = p_0 \tag{8}$$

当 $X>0$ 时，其概率密度函数为：

$$f_X(x) = \frac{1-p_0}{\theta}e^{-\frac{1}{\theta}x} \tag{9}$$

收稿日期：2010-05-19；修回日期：2010-11-01。
国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B00)；国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]291)。

式中：$\theta>0$。

对应的分布函数为：

$$F_X(x)=\begin{cases}0 & x<0\\ 1-(1-p_0)\mathrm{e}^{-\frac{1}{\theta}x} & x\geqslant 0\end{cases} \tag{10}$$

X 的分布函数仅在 $x=0$ 处存在间断点，符合混合型随机变量分布函数的特点，且 X 的分布与参数 p_0 和 θ 有关。

2)净缺额发电容量 Y 的分布

根据上文可知，当备用容量为 k_r 时，Y 在零点处有离散概率值：

$$\Pr\{Y=0\}=F_X(k_r)=1-(1-p_0)\mathrm{e}^{-\frac{1}{\theta}k_r} \tag{11}$$

当 $Y>0$ 时，其概率密度函数为：

$$f_Y(y)=f_X(y+k_r)=\frac{1-p_0}{\theta}\mathrm{e}^{-\frac{1}{\theta}(y+k_r)} \tag{12}$$

Y 的分布函数为：

$$F_Y(y)=\begin{cases}0 & y<0\\ 1-(1-p_0)\mathrm{e}^{-\frac{1}{\theta}(y+k_r)} & y\geqslant 0\end{cases} \tag{13}$$

可见，Y 为混合型随机变量，当 X 的分布确定时，Y 的分布仅与参数 k_r 有关。

1.3　实时电价的分布

过去常采用正态分布描述电价，但是实际电价分布具有不对称和厚尾特性，正态分布描述存在局限。极值理论是一种研究随机变量尾部分布的理论[8]。文献[9-11]分别以实际电力市场为例，验证了极值理论拟合实时电价尾部具有较好的效果。

选择基于广义帕累托分布(GPD)的极值理论描述实时电价。三参数形式 GPD 模型[12]为：

$$G_{\xi,\beta,u}(p)=G_{\xi,\beta}(p-u)=\begin{cases}1-\left[1+\dfrac{\xi}{\beta}(p-u)\right]^{-\frac{1}{\xi}} & \xi\neq 0\\ 1-\exp\left(-\dfrac{p-u}{\beta}\right) & \xi=0\end{cases} \tag{14}$$

式中：ξ 为形状参数；β 为标尺参数；u 为位置参数。

超额分布函数 $F^{[u]}(q)$ 定义如下：

$$F^{[u]}(q)=\Pr\{P-u\leqslant q\mid P>u\} \tag{15}$$

式中：$0\leqslant q<P_F-u$，P_F 为 P 的右端点，且 $P_F\leqslant\infty$。

$F^{[u]}(q)$ 表示当 P 超过阈值 u 时，超出部分最大为 q 的概率，其与普通分布函数的关系为：

$$F^{[u]}(q)=\frac{F(q+u)-F(u)}{1-F(u)} \tag{16}$$

根据 Pickands-Balkema-de Haan 定理有：

$$\lim_{u\to P_F}\sup_{0\leqslant q\leqslant P_F-u}|F^{[u]}(q)-G_{\xi,\beta,u}(q)|=0 \tag{17}$$

当 u 较大时，近似有：

$$F^{[u]}(p-u)=G_{\xi,\beta}(p-u) \tag{18}$$

用历史仿真法得到 $F(u)$，计算公式为：

$$F(u)=\frac{n-n_u}{n} \tag{19}$$

式中：n 为样本数；n_u 为大于阈值 u 的样本个数。

用最大似然估计法得到 GPD 模型的参数 $\hat{\xi}$ 和 $\hat{\beta}$，得到当 $p>u$ 时的分布函数 $\hat{F}(p)$ 为：

$$\hat{F}(p)=1+\frac{n_u}{n}(G_{\hat{\xi},\hat{\beta}}(p-u)-1) \tag{20}$$

将式(14)代入式(20)，当 $\xi\neq 0$ 时，得到：

$$\hat{F}(p)=1-\frac{n_u}{n}\left(1+\hat{\xi}\frac{p-u}{\hat{\beta}}\right)^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \tag{21}$$

当 $w>F(u)$ 时，有

$$p=u+\frac{\hat{\beta}}{\hat{\xi}}\left\{\left[\frac{n}{n_u}(1-w)\right]^{-\hat{\xi}}-1\right\} \tag{22}$$

1.4　净缺额发电容量 Y 持续时间的分布

为简化起见，仅考虑单位小时 Y 带来的风险，令 $T_Y=1$ h。

1.5　损失函数的分布

损失函数 L 如式(7)定义，L 的分布函数为：

$$F_L(l)=\iint_{\Omega}f(y,p)\mathrm{d}y\mathrm{d}p \tag{23}$$

式中：Ω 为 $(P-c)sYT_Y\cos\varphi<l$ 的积分区域；被积函数 $f(y,p)$ 为 Y 和 P 的联合概率密度。

当 Y 和 P 相互独立时，有

$$f(y,p)=f_Y(y)f_P(p) \tag{24}$$

P 为连续型随机变量，而 Y 为混合型随机变量，两者的乘积应该为混合型随机变量。可以采用蒙特卡洛抽样法得到 L 的近似分布。

2　综合风险指标及联合规避策略

2.1　综合风险指标

工程风险常用指标为损失的期望，金融风险常用指标包括波动率、下方波动率、风险价值(VaR)、条件风险价值(CVaR)等。在第 1 节损失模型的基础上，给出 3 种工程及金融综合风险指标。

1)以损失的期望作为风险指标，有

$$r_1=E(L_Y)=E[(P-c)sYT_Y\cos\varphi] \tag{25}$$

2)以 VaR(一定置信水平下的最大损失)作为风险指标，有

$$r_2=\mathrm{VaR}(L_Y)=\mathrm{VaR}[(P-c)sYT_Y\cos\varphi] \tag{26}$$

3)以 CVaR(一定置信水平下的超额损失期望)作为风险指标，有

$$r_3=\mathrm{CVaR}(L_Y)=\mathrm{CVaR}[(P-c)sYT_Y\cos\varphi] \tag{27}$$

比较 3 种指标可知：①3 种指标都包含净缺额

发电容量 Y 和实时电价 P 这 2 个随机变量,兼具工程风险和金融风险的特点。②采用第 1 种指标容易忽略风险。③由于 Y 的分布使得低置信水平下的 VaR 容易呈现零值,采用后 2 种指标时,应适当选择较高置信水平(95%以上)的 VaR 和 CVaR。

2.2 联合规避策略

在缺额发电容量 X 相同的情况下,可增加备用容量 k_r 来降低净缺额发电容量 Y,进而规避风险:

1)计算不同备用容量 k_r 下的综合风险指标 R。

2)计算风险规避量:

$$\Delta R = R(0) - R(k_r) \tag{28}$$

3)根据经济理论中机会成本的定义,预留备用容量会带来机会成本,反映为该部分容量用于电能交易的获利。假设 k_r 可以用于电能交易的合同部分,机会成本为:

$$C_{oppc} = (f - c)sk_r T_r \cos\varphi \tag{29}$$

式中:T_r 为备用容量持续时间。

4)通过比较不同 k_r 下的 ΔR 与 C_{oppc} 作出决策。

3 算例仿真

以加拿大 Alberta 省电力市场为研究算例。选择 2001 年 10 月—2004 年 5 月的冬季高峰期(11:00—20:00)实时电价数据为原始数据,时间范围包括 24 个月(2001 年 10 月—2002 年 5 月,2002 年 10 月—2003 年 5 月,2003 年 10 月—2004 年5 月),实时电价统计结果[11]如下:样本数为 7 290,均值为 80.62 加元/(MW·h),标准差为 79.55 加元/(MW·h),偏度系数为4.264 3,峰度系数为30.154 4,电价最小值 9.81 加元/(MW·h),电价最大值为 1 000 加元/(MW·h)。

某发电商所有机组总额定容量为 3 GVA,功率因数为 0.85。根据 1.2 节模拟 X 分布。根据 1.3 节对电价尾部进行拟合,选择 $F(u)=0.9$,根据文献[11],有 $u=145.73$,$\xi=0.137\ 743$,$\beta=102.386\ 2$。采用蒙特卡洛抽样方法计算风险指标。重复实验 1 000 次,将各风险指标的 1 000 次实验结果取平均值,作为最终的风险指标。

风险随 X 的分布参数 p_0 及 θ 的变化规律分别如图 1 和图 2 所示。图 1 中:$\theta=0.1$,p_0 在 0～1 取值,间隔为 0.05;图 2 中,$p_0=0.7$,θ 在 0.05～0.15 间取值,间隔为 0.005。

由图 1 和图 2 可知,不论采用哪种风险指标,风险值都随 p_0 的增大而降低,随 θ 的增大而增大。p_0 越靠近 1,$|\Delta r/\Delta p_0|$ 越大;3 种风险指标值都近似与 θ 存在线性关系。

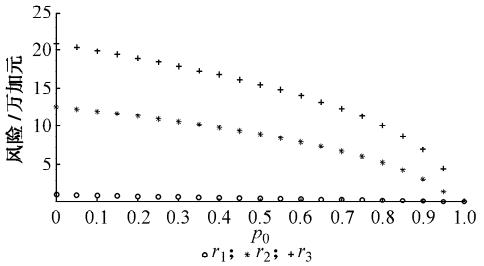


图 1 不同 p_0 取值下的 3 种风险指标
Fig. 1 Three risk indices under different p_0

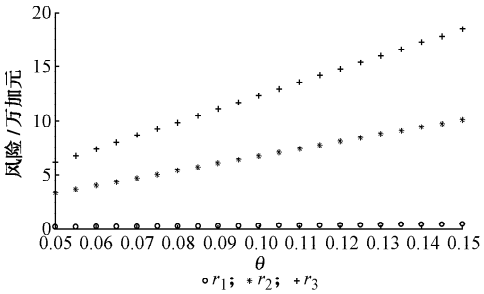


图 2 不同 θ 取值下的 3 种风险指标
Fig. 2 Three risk indices under different θ

选择 $p_0=0.7$,$\theta=0.1$ 研究风险随 k_r 的变化规律,k_r 在 0～0.1 间取值。结果见图 3。

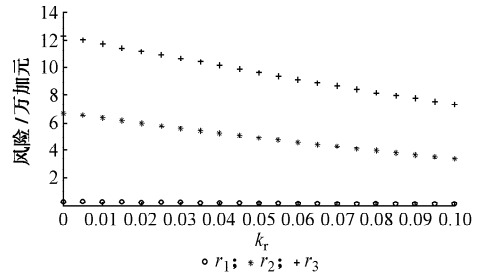


图 3 不同备用容量 k_r 下的 3 种风险指标
Fig. 3 Risk indices under different reserve capacity k_r

由图 3 可知,同样的 X,随着 k_r 的增加,Y 减小,综合风险随之减少,说明预留 k_r 能够实现发电商合同违约风险的规避;另一方面,当 k_r 给定时,选择不同的风险指标,风险值差别很大。图 3 中 r_2 和 r_3 在同一数量级(万加元),相比之下 r_1 非常小,不足后两者的 1/10。说明高置信水平下的 VaR 和 CVaR 作为风险指标更合适,而以损失期望作为风险指标容易忽略风险。

将 3 种风险规避量与预留 k_r 单日机会成本相比较,结果见图 4。由图 4 可知,随着 k_r 的增大,风险规避量增加,同时 C_{oppc} 也增加。决策者可以根据自身的风险态度,选择合适的 k_r。本例中,当 k_r 在 0～0.1间取值时,不论选择哪一种风险指标,C_{oppc} 均大于风险规避量,说明采用预留 k_r 的方法规避发电

商合同违约风险是可行的,但经济性稍差。

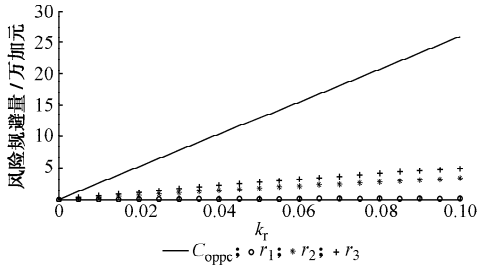


图 4　不同备用容量 k_r 下的 3 种风险规避量与备用容量机会成本

Fig. 4　Hedged risk and opportunity cost of reserve capacity under different k_r

4　结语

本文提出了综合衡量工程风险和金融风险的方法及模型,实现了风险的联合定量化评估,为各种风险规避措施的制订和效果评价提供了依据。采用预留备用容量能够改变净缺额发电容量的分布,从而实现发电商合同违约风险的规避,定量评估了不同备用容量下的风险规避效果。但是,采用预留备用容量的经济性稍差,可以尝试从金融角度规避风险。

参考文献

[1] 薛禹胜,刘强,DONG Zhaoyang,等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(14):1-6.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.

[2] 赵珊珊,周子冠,张东霞,等. 大区互联电网动态稳定风险评估指标及应用[J]. 电网技术,2009,33(2):68-72.
ZHAO Shanshan, ZHOU Ziguan, ZHANG Dongxia, et al. Risk assessment index of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 68-72.

[3] 赵珊珊,仲悟之,张东霞,等. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):1-5.
ZHAO Shanshan, ZHONG Wuzhi, ZHANG Dongxia, et al. Risk assessing method of transient voltage instability and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 1-5.

[4] 周浩,张富强. 采用 VaR 历史模拟方法计算电力市场短期金融风险[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):14-18.
ZHOU Hao, ZHANG Fuqiang. Calculation of short-term financial risk in electricity market by VaR historical simulation method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 14-18.

[5] 周浩,文福拴,张富强,等. 电力市场风险管理[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.

[6] OUM Y, OREN S, DENG Shijie. Hedging quantity risks with standard power options in a competitive wholesale electricity market[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(7): 697-712.

[7] TANG P, CALLAN A. Contract optimisation and market operation—a generator's perspective [C]// Proceedings of CIGRE International Symposium, October 27-31, 2009, Guilin, China.

[8] de HAAN L, FERREIRA A. Extreme value theory: an introduction [M]. New York, NY, USA: Springer, 2006: 302-379.

[9] NE BYSTRÖM H. Extreme value theory and extremely large electricity price changes[J]. International Review of Economics & Finance, 2005, 14(1): 41-55.

[10] KLUPPELBERG C, MEYER-BRANDIS T, SCHMIDT A. Electricity spot price modeling with a view towards extreme spike risk[J]. Quantitative Finance, 2010, 10(9): 963-974.

[11] ZHANG Wei. Extreme value theory analysis of Alberta power price[D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2005.

[12] MCNEIL A J. Extreme value theory for risk managers[M]// Internal Modeling and CAD Ⅱ. London, UK: Risk Books, 1999: 99-113.

赵珊珊(1983—),女,通信作者,博士,主要研究方向:电力经济与安全。E-mail: zhaoss@epri.sgcc.com.cn

梁　双(1983—),女,博士研究生,主要研究方向:电力经济与安全。

张东霞(1964—),女,教授级高级工程师,主要研究方向:电力经济分析及电力系统分析与控制。

Assessment and Hedging of Contract Unfulfilling Risks Facing Generation Companies

ZHAO Shanshan, LIANG Shuang, ZHANG Dongxia, YIN Yonghua

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Risk assessment and hedging are essential jobs for generation companies in a deregulated environment. An engineering risk and financial risk combined evaluation method and corresponding hedging strategy are proposed. The risk of contract unfulfilling facing generation companies is studied, and reserve capacity is used as the hedging strategy. The hedging effect under different proportions of reserve capacity is investigated. The Canadian Alberta electricity market is used as a study case. Simulation results show that reserve capacity can achieve combined hedging by changing net shortage capacity.

This work is supported by National Key Technology Research and Development Program (No. 2008BAA13B00) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]291).

Key words: risk of contract unfulfilling; risk assessment; risk hedging; electricity market